

Search for Muon Neutrino Oscillations in Kamiokande and Super Kamlokande

著者	畠山 衆一郎
号	41
学位授与番号	1574
URL	http://hdl.handle.net/10097/38508

氏名・(本籍)	はたけ やま しゅういちろう 畠 山 衆一郎
学位の種類	博士(理学)
学位記番号	博第1574号
学位授与年月日	平成10年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科, 専攻	東北大学大学院理学研究科(博士課程)物理学専攻
学位論文題目	Search for Muon Neutrino Oscillations in Kamiokande and Super Kamiokande (カミオカンデとスーパーカミオカンデにおけるミューオン・ニュートリノ振動の探索)
論文審査委員	(主査) 教授 鈴木 厚 人 教授 山口 晃, 助教授 阿部 浩 也

論文目次

- 1 Introduction
- 2 Kamiokande and Super-Kamiokande Detectors
- 3 Event Selection
- 4 Observed Flux of Upward Through Going Muons
- 5 Expected Flux of Upward Through Going Muons
- 6 Results and Discussions
- 7 Conclusion

論文内容要旨

序

ニュートリノに質量があるかどうかは、現在素粒子物理学の中で解決されていない重要な問題の一つである。直接的な検証方法として例えば ν_e の場合 ^3H の β 崩壊を用いた実験があるが、実験精度の限界で $m_{\nu_e} \leq 10\text{eV}$ 程度の上限值までしか測定されていない。極微の質量に対してより感度の良い検証実験の一つにニュートリノ振動実験がある。ニュートリノ振動とは、ニュートリノに有限の質量があり、異なる質量の固有状態の混合状態だと仮定すると、フレーバーの固有状態と質量の固有状態で時間変化にずれが生じて、始状態と終状態でニュートリノのフレーバーが異なってくる現象である。電子ニュートリノの関わらない $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ 振動の場合、 ν_μ がフレーバーを変えずに ν_μ として観測される確率は、 ν_μ と ν_τ の質量の二乗差 $\Delta m'^2$ 、混合角 θ'_ν 、 ν_μ のエネルギー E_ν 、 ν_μ の発生源と観測地点の距離 L を用いて、

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2 2\theta'_\nu \sin^2 \frac{\Delta m'^2 L}{4E_\nu}$$

と表わされる。一方、電子ニュートリノの関わる $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ 振動の場合、物質中の電子の密度 N_e が、 ν_e と ν_μ の質量の二乗差 Δm^2 、混合角 θ_ν と $N_e = \frac{\Delta m^2}{2\sqrt{2}G_F E_\nu} \cos 2\theta_\nu$ の関係になったとき、共鳴状態となり振

動が促進される効果が現れる。ここで G_F はフェルミの結合定数である。

本研究では、水チェレンコフ型検出器、Kamiokande-II, IIIとSuper-Kamiokandeを用いて大気ニュートリノを観測し、 $\nu\mu \leftrightarrow \nu\tau$, $\nu e \leftrightarrow \nu\mu$ 振動の探索を行なった。ここで大気ニュートリノとは、一次宇宙線が大気中の核子と反応してできた π , Kメソンの崩壊によって生成されたニュートリノのことである。大気ニュートリノの測定方法として、検出器の中でニュートリノが反応し生成された電子やミューオンのチェレンコフ光を観測する事象 (Contained Event) と、検出器の周りの岩盤で反応し生成されたミューオンが検出器に入射してそのチェレンコフ光を観測する事象 (Upward Going Muon Event) がある。本研究では、後者の事象で特にミューオンが検出器を突き抜けるような事象 (Upward Through Going Muon Event) を扱う。

Contained Eventについては、大気ニュートリノのフラックスの不定性 (20%) を押さえるために、電子事象とミューオン事象の比をとり観測値と理論値が比較され、Kamiokande-II, IIIの解析では $\Delta m'^2$, $\Delta m^2 \sim 10^{-2} eV^2$, $\sin^2 2\theta'_{\nu\mu}$, $\sin^2 2\theta_{\nu e} \geq 0.6$ という結果が出ている。一方、Upward Through Going Muon Eventではミューオンのみ検出器に届くので電子事象との比をとることはできないが、対象としているミューオンニュートリノが高エネルギー ($E_\nu \sim 100 GeV$) であるため、精度の良い天頂角分布が得られるという特徴がある。さらにフラックスの天頂角分布の傾きのみを注目すれば、絶対値の不定性が5%程度に押さえられる。そこで、本研究では、フラックスの絶対値をスケールパラメータで調整し天頂角分布を理論値と観測値で比較した。

事象選別

Upward Through Going Muonの選別方法は、以下の手順を踏む。まず、検出器を突き抜けるミューオンのエネルギー損失はそのトラック長に比例するため、光電子増倍管から得られた総電荷量を用いて、トラック長5 m以下に相当する総電荷量の事象をカットする。次に、ミューオンの方向のフィッティングを行ない、天頂角方向で下向きの事象を宇宙線ミューオンとしてカットする。残った事象の中からカットしきれなかった宇宙線ミューオン事象やトラック長が7 m以下の事象をアイスクャンでカットする。最終的に残った事象は、マニュアルで方向をフィッティングして角度精度を上げる。ここで、7 mのトラック長カットはミューオンのエネルギー閾値として1.6 GeVに相当するが、実際は7 m以上でも検出器の中で止まってしまう事象はカットしているので、エネルギー閾値は平均としてKamiokande-II, IIIで $\langle E_{th} \rangle = 2.8 GeV$, Super-Kamiokandeで $\langle E_{th} \rangle = 6.0 GeV$ である。事象選別の結果、Kamiokande-II, IIIでは、実効測定時間2,456日で373事象、Super-Kamiokandeでは、実効測定時間363日で413事象のUpward Through Going Muonが残った。

バックグラウンド事象

天頂角 $\cos \theta > 0$ から岩盤を突き抜けて検出器まで到達する宇宙線ミューオンは、Upward Through Going Muon Eventの観測において、唯一のバックグラウンド事象となるが、水平方向付近の宇宙線ミューオンの天頂角分布を測定することにより、上向き ($\cos \theta < 0$) 方向へのしみ込みが見積られた。その結果、Kamiokande-II, IIIでは $-0.1 < \cos \theta < -0.04$ の方向に10%, Super-Kamiokandeでは $-0.1 < \cos \theta < 0$ の方向に-4.2%程度のしみ込みがあることが判った。

結 果

全フラックスに関しては、理論値

$$\Phi_{\text{exp}}^{k23} = 2.51^{+0.18}_{-0.21} (\text{model})^{+0.54}_{-0.46} (20\%),$$

$$\Phi_{\text{exp}}^{sk} = 2.05^{+0.13}_{-0.17} (\text{model})^{+0.44}_{-0.38} (20\%).$$

に対し、観測値は、

$$\Phi_{\text{obs}}^{k23} = 1.94 \pm 0.10 (\text{stat})^{+0.07}_{-0.06} (\text{syst}),$$

$$\Phi_{\text{obs}}^{sk} = 1.72 \pm 0.08 (\text{stat})^{+0.01}_{-0.02} (\text{syst}).$$

(単位: $10^{-13} \text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1} \text{sr}^{-1}$) となった。ここで、理論値の誤差 (model) は計算に使用した大気ニュートリノフラックスと核子内でのパートン分布関数のモデルによる違いで、誤差 (20%) は大気ニュートリノフラックスの絶対値の20%の不定性を表わしている。また、観測値の方は、(stat) は統計誤差、(syst) は系統誤差を表わしている。両者を比較すると、観測値の方が低い傾向になったが、大気ニュートリノフラックスの不定性20%を考慮すると両者は合っているといえる。

フラックスの天頂角分布に関しては、 χ^2 を以下のように定義して理論値と観測値の比較を行ない、 $\nu\mu \leftrightarrow \nu\tau$ 振動と $\nu e \leftrightarrow \nu\mu$ 振動を検証した。

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{10} \left\{ \frac{\left(\left(\frac{d\Phi_{\mu}}{d\Omega} \right)_{\text{obs}}^i - \alpha \left(\frac{d\Phi_{\mu}}{d\Omega} \right)_{\text{osc}}^i \right)^2}{\sigma_{\text{obs}}^i} \right\} + \left\{ \frac{1 - \alpha}{\sigma_{\alpha}} \right\}^2$$

ここで、添字 i は i 番目の天頂角の bin, $\left(\frac{d\Phi_{\mu}}{d\Omega} \right)_{\text{obs}}^i$ は観測されたフラックス, $\left(\frac{d\Phi_{\mu}}{d\Omega} \right)_{\text{osc}}^i$ はニュートリノフラックスに振動確率 $P(\nu\mu \rightarrow \nu\mu)$ をかけ合わせて計算されたフラックスの理論値, σ_{obs}^i はフラックスの観測値の誤差 ($\sqrt{(\text{stat})^2 + (\text{syst})^2}$), α はフラックスの絶対値のスケールを調整するパラメータ, $\sigma_{\alpha} (= 0.2)$ はニュートリノフラックスの不定性である。

その結果, 90%Confidence Level (CL) で, $(\nu\mu \rightarrow \nu\tau)$ 振動で $\sin^2 2\theta'_\nu \sim 1$, $\Delta m'^2 \sim 6 \times 10^{-3} \text{eV}^2$, $\nu e \leftrightarrow \nu\mu$ 振動で $\sin^2 2\theta_\nu \sim 0.6$, $\Delta m^2 \sim 3 \times 10^{-2} \text{eV}^2$ の領域が残った。

ま と め

今回の解析で残ったニュートリノ振動のパラメータ領域は, Kamiokandeのcontained eventの結果と矛盾しない。しかしながら, $\nu e \leftrightarrow \nu\mu$ 振動では原子炉ニュートリノ実験Choozが $\Delta m^2 > 10^{-3} \text{eV}^2$ の領域を否定している。このことから, $\nu e \leftrightarrow \nu\mu$ に関しては太陽ニュートリノ実験が示唆している $\Delta m^2 \sim 10^{-5} \text{eV}^2$ 付近に許容領域が残される。

論文審査の結果の要旨

本論文はカミオカンデⅡ、Ⅲ実験とスーパーカミオカンデ実験のデータ解析によりミューオン・ニュートリノ振動の探索を行ったものである。実験は神岡鉱山の地下1,000メートルにある3,000トン水チェレンコフ測定器カミオカンデと、新たに建設された50,000トンの大型水チェレンコフ検出器を用い、検出器を上向きに突き抜けるミューオン事象を選別し、その天頂角分布を理論値と比較することによりミューオン・ニュートリノ振動の有無を調べるものである。検出器内で反応を起こしたニュートリノ事象（検出器包含事象）を使った解析手法に比べ、検出されるミューオンが高いエネルギーを持つので精度の良い天頂角分布が得られる利点がある。

解析の結果、観測されるニュートリノフラックスはカミオカンデⅡ、Ⅲとスーパーカミオカンデ共に理論値に比べて約20%低めであるが、大気ニュートリノフラックスと核子のパートン分布関数の不定性に由来する理論値の誤差（約20%）の範囲であることがわかった。しかしフラックスの絶対値をパラメータとして含めて角分布のフィットを行うと $\nu\mu \leftrightarrow \nu\tau$ 振動、 $\nu\mu \leftrightarrow \nu e$ 振動の各々について $\sin^2 \theta - \Delta m^2$ 平面での許容領域（90% C L）が得られた。

これらの結果は、スーパーカミオカンデによる新しいデータを加え統計精度を大きく上げた上で、カミオカンデでの検出器包含事象による解析結果と矛盾しない結果となった点で、ニュートリノ振動について新たな知見とニュートリノ研究の重要性を提供するものであり、この解析手法による一層の研究の進展が望まれる。

以上のように本論文は、大気ニュートリノを用いたニュートリノ振動に関する最新の研究成果を含んでおり、本人が自立して研究活動を行うに必要な高度の研究能力と学識を有することを示している。したがって畠山衆一郎の論文は博士（理学）の学位論文として合格と認める。